

架設途中の吊橋ケーブルの簡易温度推定法

A SIMPLE METHOD FOR ESTIMATION OF CABLE TEMPERATURE DURING CABLE ERECTION

新家 徹*・頭井 洋**・大谷 修***
By Tohru SHINKE, Hiroshi ZUI and Osamu OHTANI

1. まえがき

吊橋の主ケーブル架設において、ケーブル長の調整はサグ管理により行われるのが一般的であり、普通昼間にストランドの架設を行い、夜間に調整作業が行われる。この調整作業を精度よく能率的に行うためには、時々刻々変化しているケーブル温度を迅速かつ正確に推定することが必要となる。しかしケーブル温度は、夜間であっても昼間を含めた数日前からの天候条件の影響が持ち込まれているため、正確にその温度を推定することは困難とされてきた。

近年、この推定に非定常熱伝導解析を応用する方法が提案されている。その際の解析法として、日射や外気温等を与えて Neumann 型の境界値問題として取り扱う方法やケーブル表面温度を与える Dirichlet 型の境界値問題として取り扱う方法等がある。しかし、いずれの方法においても架設中のような任意断面形状を取り扱うには、FEM、差分法等の数値計算を行わざるを得ないことになる。時々刻々変化する境界条件や断面形状の変化を与えて数値解析でケーブル温度を逐次追跡していくことは、大型 Computer の使用によって可能であっても、実際のケーブル架設を想定した場合実用的な方法とはなりにくい。

そこで、本論では、ケーブル調整作業は夜間に行われ、また温度変化に

* 正会員 工博 (株)神戸製鋼所構造研究所次席研究員

** 正会員 (株)神戸製鋼所構造研究所研究員

*** 正会員 (株)神戸製鋼所構造研究所研究員

よるケーブル全体のサグ変化は断面平均温度により支配されるという従来と同様の観点に立ち、若干の誤差を許容したうえで現場での推定作業が容易な方法を提案する。本方法は、現場で簡単に計測し得るサグ調整時のケーブル表面温度を基礎としつつ、昼間等に受けた天候条件による影響を補正量として導入することにより、ケーブル断面平均温度を求めるものである。

2. ケーブル断面平均温度の推定法

(1) 屋外実物大模型実験結果の特性

ここでは、先に報告した実物大模型を用いた屋外実験結果¹⁾からケーブル断面平均温度推定の基礎となる温度応答特性について調べてみる。本屋外実験では、直径 600 mm 程度のケーブルの各架設段階を想定して作成した 7 体の供試体を用いており、PWS 127 の 1 strand の供試体、1/4・2/4 ケーブル架設段階、全ストランド架設完了段階の供試体等がある(参考文献 1)の図-8 参照。

まず屋外実験結果から得られた断面平均温度の全データを各供試体ごとに季節別に分類し各供試体の断面平均

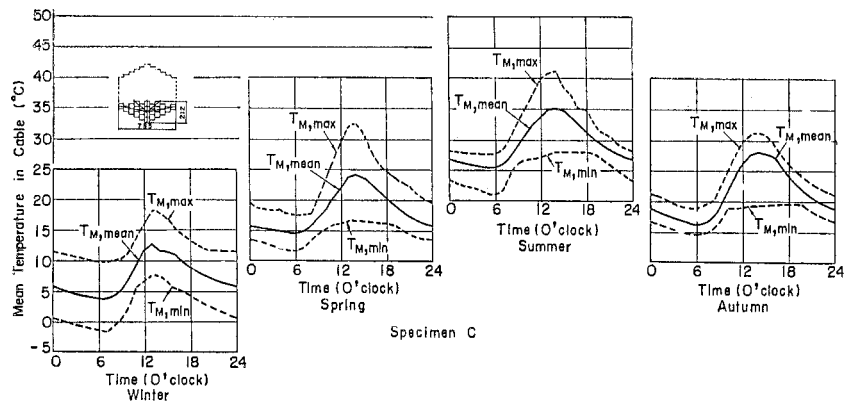


図-1 ケーブル断面平均温度の各季節における日変化

温度の各時刻における最大値・最小値・平均値を求めた。図-1 は、その一例として供試体の C について示したものである。図-1 の各記号の示す意味は次のとおりである。

断面平均温度の時刻平均：

$$T_{M,mean}(t_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_{M,j}(t_i) \dots\dots\dots(1)$$

断面平均温度の時刻最大値：

$$T_{M,max}(t_i) = \max.(T_{M,j}) \dots\dots\dots(2)$$

断面平均温度の時刻最小値：

$$T_{M,min}(t_i) = \min.(T_{M,j}) \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $T_{M,j}$ ：計測期間（各季節で2週間）中 j 番目の断面平均温度

t_i ：時刻

n ：各季節の計測日数

図-1 より、断面平均温度の時刻推移のパターンや年間の変化の概要がわかる。次に断面平均温度 $T_M(t_i)$ とケーブル表面平均温度 $T_{SM}(t_i)$ との差 $\epsilon(t_i)$

$$\epsilon(t_i) = T_M(t_i) - T_{SM}(t_i) \dots\dots\dots(4)$$

を式 (1), (2), (3)

と同じように各季節ごとに求めてみると、同一断面の $\epsilon(t_i)$ は季節にかかわらずほぼ等しい時刻変動をしていることがわかった。そこで年間を通じた全計測日数におけるデータより $\epsilon(t_i)$ の平均値 $\epsilon_{mean}(t_i)$ 、最大値 $\epsilon_{max}(t_i)$ 、最小値 $\epsilon_{min}(t_i)$ を各供試体について求めてみると図-2 のようになる。図-2 より次のようなことがわかる。

(i) ϵ の絶対値 $|\epsilon|$ および変動幅 ($\epsilon_{max} - \epsilon_{min}$) は断面積が小さいほど小さく、断面が大きくなるにつれて増大する。

(ii) 夜間は日中に比べ $|\epsilon|$, ($\epsilon_{max} - \epsilon_{min}$) とともに小さ

くなる（ここに日中を9時~16時とし夜間を20時~4時と定義して以後これに従ってこれらの用語を使用する）。

(iii) 図-2 では、四季のさまざまな天候条件を含んでいるにもかかわらず、夜間に限定すれば600mm程度の太径ケーブルでもその変動幅 ($\epsilon_{max} - \epsilon_{min}$) は高々4℃程度である。またそれ以上の太径ケーブルであっても、この変動幅はそれほど増大しない傾向にある。

(2) 断面平均温度の推定式

前節で述べた特性を考慮し、本文では、次のようなケーブル断面平均温度推定式を提案する。

$$T_M(t_i) = T_{SM}(t_i) + \alpha(t_i) \dots\dots\dots(5)$$

すなわち、ケーブル断面平均温度を推定する最も直接的な方法として、従来から行われているようにケーブル外周温度を計測し、その平均値 $T_{SM}(t_i)$ を基準にする。外周温度は接触型温度計により容易に計測できる。問題は $T_{SM}(t_i)$ の補正量 $\alpha(t_i)$ をいかに簡単かつ精度よく求めるかにあり、本文では次のような概念を提示する。

前節の結果より、 $T_M(t)$ と $T_{SM}(t)$ の差は外気温や日射量に代表される天候条件とケーブル断面積とに最も大きく影響されることがわかっているため、本文ではこの影響を1次補正量と2次補正量に区分して外周温度の補正量を決定する。

$$\alpha(t_i) = \alpha_1(t_i) + \alpha_2(t_i) \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 $\alpha_1(t_i)$ ：1次補正量（標準天候のもとでの補正）
 $\alpha_2(t_i)$ ：2次補正量（標準気温と実気温の差による補正）

1次補正量 $\alpha_1(t_i)$ は、計画された架設時期における平年の天候条件を標準にして、種々のケーブル断面積に対して断面平均温度と表面平均温度の差を計算し、グラフ表示して与えるものである。この作業は事前に行われる。この場合の計算は、任意形状のケーブル断面をそれと断面積の等しい円形断面に置換し、外気温、日照等の外的条件を境界条件とする Neumann 型の熱伝導方程式を解くことになる。この結果得られる断面平均温度と表面平均温度の差 $\epsilon(t)$ は次式のように表示される³⁾。

$$\epsilon(t) = \sum_i G_i(t) \int_0^t \{T_{air}(\tau) - T_0\} e^{-p_i \tau} d\tau + \sum_{\tau=0}^t U(t-\tau) q(\tau) \dots\dots\dots(7)$$

ここに、

$$G_i(t) = \frac{2ah}{\eta_i^2(\eta_i^2 + a^2h^2)} (2ah - \eta_i^2) p_i e^{-p_i t}$$

$$U_i = \frac{1}{\pi h} \sum G_i(1 - e^{p_i d \tau}) / p_i$$

$$q(\tau) = \beta' I(\tau) + r'E(\tau)$$

$$\eta_i : xJ_0'(x) + ahJ_0(x) = 0 \text{ の } i \text{ 番目の正根}$$

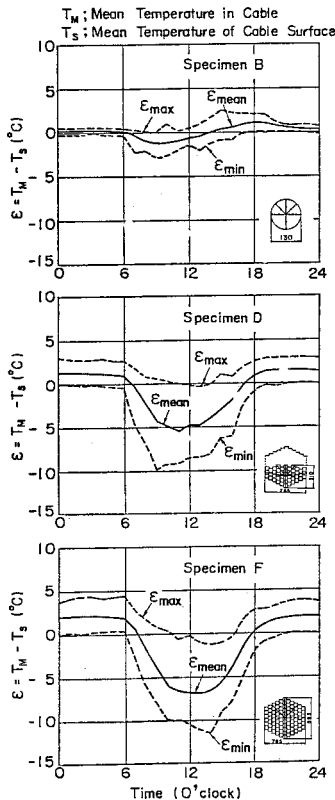


図-2 各供試体の年間を通しての全測定期間における ϵ の変動

- J_0 : 第1種0階の Bessel 関数
- $p_i = \eta_i \lambda / a^2 c \rho$, $h' = \bar{\alpha} / \lambda$, $\beta' = \bar{\beta} / \lambda$, $r' = r / \lambda$
- a : ケーブル半径 t : 応答時間
- T_{air} : 外気温 T_0 : 初期温度
- λ : 熱伝導率 $c\rho$: 熱容量
- $\bar{\alpha}$: 熱伝達率 $\bar{\beta}$: 日射吸収率
- r : 輻射率 $I(\tau)$: 法線面日射量
- $E(\tau)$: 夜間の輻射量

上式は時間0からtまでの非定常熱伝導計算を行うものであるが、計画架設時期(n日)を想定した標準値としては、時刻変化に対してn日の平均的な応答を求めるのが妥当である。すなわち、

$$\epsilon_{mean}(t_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \epsilon_j(t_i) \dots\dots\dots (8)$$

を求めることになる。この $\epsilon_{mean}(t_i)$ を求めるに際しては式(7)からn日間の非定常熱伝導計算を行わなくても、n日間の天候データの時刻平均値を用いて計算してもよい。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \bar{T}_{air}(t_i) &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_{air,j}(t_i) \\ \bar{q}(t_i) &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j(t_i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

上式を式(7)に代入して

$$\epsilon_{mean}(t) = \sum_{i=1}^n G_i \int_0^t \{ \bar{T}_{air}(\tau) - T_0 \} d\tau + \sum_{\tau=0}^t U(t-\tau) \bar{q}(\tau) \dots\dots\dots (10)$$

の非定常熱伝導計算を行う。ここで、 $\bar{T}_{air}(\tau)$ と $\bar{q}(\tau)$ については、 τ が24時間を越えるごとに同じ $\bar{T}_{air}(\tau)$, $\bar{q}(\tau)$ を繰り返し用いる。計算は、 $\epsilon_{mean}(t)$ と $\epsilon_{mean}(t-24)$ が十分小さくなるまで行い、このときの $\epsilon_{mean}(t)$ を各時刻における $\epsilon_{mean}(t_i)$ とみなす。この方法を用いれば、日数nにかかわらず非定常計算を数日間行えばよいことになる。本推定の1次補正量 $\alpha_1(t_i)$ は、この $\epsilon_{mean}(t_i)$ を用いる。

以上の解析からもわかるように1次補正の概念は、断面平均温度と表面平均温度の差に関し、ある期間の標準的な天候条件に対して求めたものを調整時に代用しようとするものである。補正量としては、ほとんどの場合これで実用上十分な精度があるが、現場で実際の推定を行う日がこの標準的な天候から大きくずれる場合もあり得る。そこで、次に推定日の天候条件を考慮した2次補正を導入し、推定精度を向上させる方法について述べる。標準天候と実天候の差としては、日射量、外気温、風等種々あるが、天候条件の差は、ケーブルに最も直接的にかつ計測可能な値としてケーブル表面温度に反映されているので、2次補正量としては、調整を行う時刻の表面温度に注目した補正項を考えるのが妥当である。さらに

夜間時においては、ケーブル表面温度は外気温と大差がないので、次式のような2次補正項を採用してよいであろう。

$$\alpha_2(t_i) = \beta \{ \bar{T}_{air}(t_i) - T_{air}(t_i) \} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $\bar{T}_{air}(t_i)$: 標準天候時の外気温
 $T_{air}(t_i)$: 調整時の外気温

この概念のもとでは、 β は標準天候時と調整時の外気温の差によるケーブル断面平均温度と表面平均温度の応答倍率差を意味するもので、 β はケーブル断面積に最も支配され、断面積の小さなものではゼロである。この β を屋外実験から最適手法により求めると断面積と β の間には図-3に示すような曲線が得られる。

以下本推定法を屋外実験結果と比較して、その妥当性を検証する。図-4, 5にその結果の一例を示した。図-4で破線は、秋の天候の実測データ(外気温・日射量・風速等)の平均値を式(10)に代入して求めた1次補正量 α_1 を示している。また実線は対応する計測データより求めた断面平均温度と表面平均温度の差の時刻平均値を示している。日中若干の差はあるが、いずれの断面についても両者よく一致しており、特に夜間に限定するとその差は高々1°C程度である。したがって、標準天候として期間平均値を採用しておけば、おおむね妥当な1次補正量 α_1 が得られることになる。次に α_1 を用いた場合の各日の誤差の程度と2次補正を行った場合の精度を調べてみる。図-5は、供試体Fについて秋季の

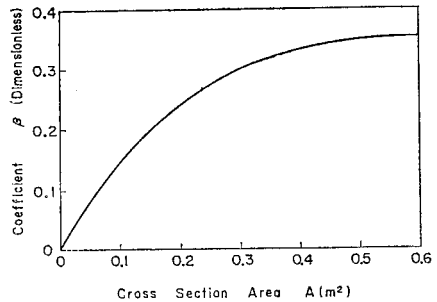


図-3 2次補正量に用いる係数 β と断面積との関係

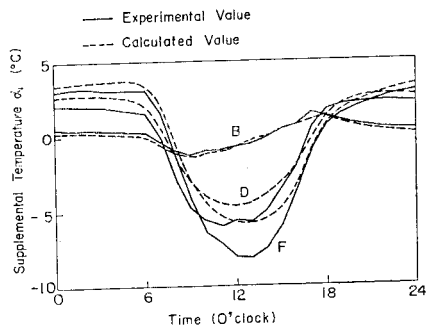


図-4 各供試体の補正量の計算値と実験値の比較

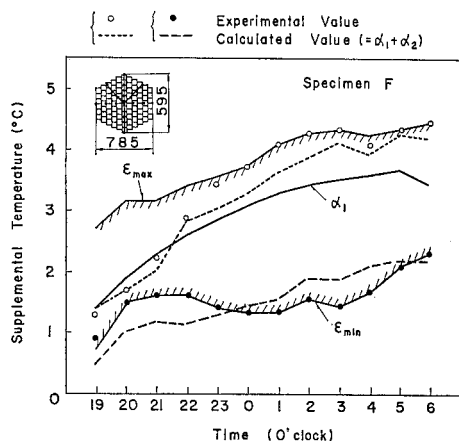


図-5 供試体 F の補正量 α と実験値 ϵ の関係

実験および計算結果を示している。図中の ϵ_{max} , ϵ_{min} は、秋季の実測データから求めたケーブル断面平均温度と表面平均温度の差 ϵ_i の各時刻ごとの最大値および最小値であり、 α_1 は前述の計算により求めた1次補正量である。 α_1 と ϵ_{max} あるいは ϵ_{min} との差は、 $\pm 2^\circ\text{C}$ 程度の範囲に収まっていることがわかる。

したがって1次補正量だけを用いてもかなりの精度で断面平均温度を推定できるといえよう。さらに α_1 だけでは誤差が大きくなるような ϵ_{max} , ϵ_{min} の生じる日に対して、2次補正量までを含めた場合の比較を行った。図-5の点線および破線が総補正量 ($\alpha_1 + \alpha_2$) であり、そのときの計測値が○および●印で示したものである。それらはよく一致しており、2次の補正量まで含めることにより、推定精度がさらに向上していることがわかる。

以上、本推定法は、実用上十分な精度で断面平均温度の推定が可能であると考えられる。

3. 本推定法の現場での適用方法

最後に本方法を実際の現場で用いる場合の手順について述べる。

1) まず吊橋架設地点の架設期間における過去の天候条件を調べ、架設時期の標準的な天候を設定する。

2) 1) のデータを用いて、式 (10) から数種の架設段階における1次補正量 $\alpha_1(t_i)$ を求める。これから図-6に示すようなグラフを作成しておく。

以上の作業は、架設前にあらかじめ行うことができる。以下の作業は、実際のケーブル断面平均温度推定時に行う。

- 3) 既設ケーブルの断面積または換算直径を求める。
- 4) 計測時刻、断面積等からすでに作成した図-6のグラフを用いて1次補正量 α_1 を求める。
- 5) 既設ケーブルの表面温度を周方向に数点計測し、線形補間等により表面平均温度 T_s を求める。この作業は橋軸方向の温度差を考慮して径間内で数か所行い平均値を使用する。
- 6) 推定時の外気温と α_1 を求めたときの標準外気温との差に図-3の β を乗じて2次補正量 α_2 を求める。
- 7) 後は、式 (5), (6) から断面平均温度を求める。

このように、本推定法は現場での作業が容易であり、計測器機としても接触温度計、気温計等の簡単なものを準備するだけでよい。

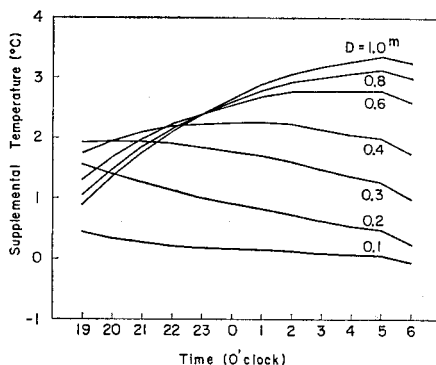


図-6 1次補正量とケーブル径の関係

4. 結 論

本文では、著者らがこれまで行ってきた架設途中における吊橋主ケーブルの温度応答に関する研究成果を活用して、ケーブル断面平均温度の簡易推定法を提案したものである。

本方法の特徴は、ケーブル外周温度のみに頼っていた従来の推定法に合理的な補正量を導入することにより、現場での複雑な計算を行うことなく推定精度を高め、太径ケーブルにも適用可能にしたところにある。

参 考 文 献

- 1) 新家 徹・頭井 洋・大谷 修・湊 理宙：架設途中における吊橋ケーブルの温度応答に関する研究，土木学会論文報告集，第302号，1980年10月。
- 2) 大谷 修・頭井 洋・新家 徹：架設途中における吊橋主ケーブルの断面平均温度推定の一方法，土木学会第35回年次学術講演会概要集，昭和55年9月。
- 3) 原田康夫・長谷川鎧一：吊橋ケーブルの温度応答に関する研究，土木学会論文報告集，第251号，1979年7月。
(1981.8.25・受付)